

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

SIMULÁTOR PŘENOSOVÝCH FUNKCÍ SILNOPROUDÉHO VEDENÍ V
OMNET++

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PAVEL KARAS

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

SIMULÁTOR PŘENOSOVÝCH FUNKCÍ SILNOPROUDÉHO VEDENÍ V OMNET++

SIMULATOR OF CHANNEL RESPONSE OF POWER LINE COMMUNICATION IN OMNET++

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PAVEL KARAS

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR MLÝNEK, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Pavel Karas

ID: 125474

Ročník: 2

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Simulátor přenosových funkcí silnoprůdého vedení v Omnet++

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s technologií datové komunikace po silnoprůdém vedení. Seznamte se s možností simulace PLC komunikace v simulačním prostředí OMNeT++. Připravte prostředí pro realizaci modelu PLC komunikace pro potřeby simulace fyzické a linkové vrstvy PLC úzkopásmové služby tak, aby uživatelé simulátoru mohli jednoduše implementovat a testovat protokoly vyšších vrstev.

Cíle práce:

1. Vytvořte framework nad prostředím OMNeT, který bude uživatelům poskytovat prostředky pro vytváření simulací PLC komunikace. Uživatel bude moci jednoduše definovat topologii, rušení, impedance, odbočky, modulace, standardy a vrstvy protokolů.
2. Implementujte základní vrstvy OSI modelu pro simulaci PLC (především fyzickou a linkovou). U fyzické vrstvy jde především o model silnoprůdého vedení a u linkové vrstvy o přístup na sdílené medium.
3. Realizujte ukázkovou uživatelskou implementaci pro jednoduchou topologii s třemi odbočkami.
4. Vytvořte dokumentaci frameworku.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Power line communications: theory and applications for narrowband and broadband over power lines. 1st ed. Editor Hendrik Ferreira. Chichester: John Wiley, 2010, 507 s. ISBN 978-047-0740-309.
- [2] S. Galli, A. Scaglione, Z. Wang, "For the Grid and Through the Grid: The Role of Power Line Communications in the Smart Grid," Proceedings of the IEEE, vol. 99, no.6, 2011.

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 26.5.2015

Vedoucí práce: Ing. Petr Mlýnek, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
Předseda oborové rady

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá popisem a vlastnostmi datové komunikace po silových vedeních. Komunikace po silových vedeních je technologie využívající k přenosu informace elektrická vedení. Její úzkopásmová varianta se v dnešní době rozvíjí v oblasti dálkového odečtu dat. V tomto směru vznikají stále nová řešení, které je potřeba simulovat a testovat ještě před nasazením do praxe. Cílem této práce je připravit simulační prostředí OMNeT++ pro účely simulace úzkopásmové sítě PLC.

KLÍČOVÁ SLOVA

simulace, komunikace po silových vedeních, silnoprůdové vedení, OMNeT, MiXiM framework, úzkopásmová služba

ABSTRACT

The diploma's thesis is focussed on principles and characteristics of Powerline Communication. Powerline communication is a technology using powerlines for transmitting information. Its narrowband variant is developing in the field of remote data reading nowadays. There is a lot of solutions that need to be tested and simulated prior to putting into practice. This thesis deals with preparing the OMNeT++ simulation environment for purposes of simulating the narrowband service PLC.

KEYWORDS

simulation, powerline communication, power line, OMNeT, MiXiM framework, narrowband service

KARAS, Pavel *Simulátor přenosových funkcí silnoprůdového vedení v Omnet++*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2015. 43 s. Vedoucí práce byl prof. Ing. Petr Mlýnek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Simulátor přenosových funkcí silnoprůduho vedení v Omnet++“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Petr Mlýnek Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....
(podpis autora)

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| Úvod | 11 |
| 1 Simulátor přenosových funkcí silnoproudého vedení v Omnet++ | 13 |
| 1.1 Silová vedení | 13 |
| 1.1.1 Rozdělení elektrické sítě | 15 |
| 1.1.2 Domácí elektroinstalace | 16 |
| 1.2 Technologie PLC | 16 |
| 1.2.1 Základní prvky PLC sítě | 18 |
| 1.2.2 Úzkopásmová služba PLC | 19 |
| 1.2.3 Širokopásmová služba PLC | 21 |
| 1.2.4 Dálkový odečet dat | 23 |
| 1.2.5 Přístupové metody ke sdílenému médiu | 23 |
| 1.3 OMNeT++ | 24 |
| 1.3.1 Jazyk NED | 25 |
| 2 Návrh řešení | 26 |
| 2.1 Výběr simulačního frameworku pro prostředí OMNeT | 26 |
| 2.2 Model fyzické vrstvy | 27 |
| 2.2.1 Definice topologie sítě a uzlů | 27 |
| 2.2.2 Možnost vstupu dat | 28 |
| 2.2.3 Přenosová funkce a zpoždění kanálu | 28 |
| 2.2.4 Formát vstupních dat | 28 |
| 2.2.5 Řešení kolizí | 31 |
| 2.2.6 Rušení | 31 |
| 2.2.7 Přenosová rychlost kanálu | 32 |
| 2.3 Model linkové a vyšších vrstev | 32 |
| 2.4 MiXiM | 33 |
| 2.4.1 Základní struktura sítě | 33 |
| 2.4.2 Komunikace mezi uzly sítě | 35 |
| 2.5 Reprezentace signálu | 35 |
| 2.5.1 Útlum signálu | 35 |
| 2.5.2 Kvalitativní zpracování signálu | 36 |
| 2.5.3 Komponenty fyzické vrstvy | 36 |
| 2.6 Realizace | 37 |
| 2.6.1 Instalace OMNeT | 37 |
| 2.6.2 Rozdělení projektů | 37 |
| 2.6.3 Struktura NED balíků | 38 |

| | |
|---|-----------|
| 2.7 Testování | 38 |
| 3 Závěr | 39 |
| Literatura | 40 |
| Seznam symbolů, veličin a zkratk | 41 |
| Seznam příloh | 42 |
| A Obsah přiloženého CD | 43 |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Rozvodna. | 14 |
| 1.2 | Struktura elektrické napájecí sítě. | 15 |
| 1.3 | Přenosová soustava – nadzemní vedení. | 16 |
| 1.4 | PLC síť. | 19 |
| 1.5 | OMNeT++ 4.2.2. | 24 |
| 2.1 | Topologie sítě – ukázka | 31 |

SEZNAM TABULEK

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Možné zdroje rušení PLC a jejich pásma | 18 |
| 1.2 | Kmitočtová pásma v úzkopásmové verzi PLC podle normy CENE- LEC | 20 |

ÚVOD

V současné době je patrný velký rozmach telekomunikačních sítí poskytujících telekomunikační služby k uspokojení nároků jednotlivých uživatelů z hlediska šířky pásma a kvality služeb. Způsobů komunikace mezi jednotlivými koncovými zařízeními je celá řada. Výběr mezi nimi závisí na aktuálních přenosových podmínkách, zvoleném médiu, na kterém bude komunikace probíhat a požadavcích na šířku pásma k realizaci požadované služby, což mohou být pomalé signalizační přenosy přes vysílání videa v HDTV kvalitě v přístupových sítích až po směrování obrovských objemů dat v páteřních sítích.

Tato práce se bude zabývat komunikací Powerline Communication (PLC), což je způsob komunikace využívající jako komunikační kanál silové energetické rozvody. Možnost přenášet datové zprávy s využitím stávajících energetických rozvodů jako komunikačního média přináší nový impuls pro rozvoj aplikací v oblasti průmyslové automatizace, integrace a jiných komunikačních řešení. PLC technologie umožnila razantní snížení nákladů v oblastech vyžadujících komunikaci mezi jednotlivými komponenty systému z důvodu odbourání nákladů na komunikační infrastrukturu, což je např. nákup a pokládka kabeláže pro samotnou komunikaci.

Široké spektrum využití PLC systému poskytuje slibnou konkurenci k současným sítím. PLC je možné rozdělit na úzkopásmové, využívající kmitočtové pásmo v řádu desítek kHz a širokopásmové systémy s šířkou pásma v řádu desítek MHz.

Širokopásmové systémy se vyznačují o mnoho vyššími přenosovými rychlostmi (více než 2 Mbit, můžeme na ně pohlížet jako na alternativu k současným klasickým sítím typu Ethernet na standardu 802.3 a k bezdrátovým sítím WIFI. Mohou být využity k překlenutí vzdálenosti okolo stovek metrů, mezi lokálními počítačovými sítěmi LAN v rozsahlých kampusech, mezi budovami nebo k sestavení domovní počítačové sítě bez použití strukturované kabeláže, kde se můžeme setkat s reálnými přenosovými rychlostmi přesahujícími 20 Mbit/s.

Mezi úzkopásmové systémy lze uvést pomalé datové přenosy v průmyslovém prostředí, odečítání informací z elektroměrů či plynoměrů. V domovní instalaci je možno využít úzkopásmové systémy pro kontrolní účely (kontrola teploty, osvětlení, klimatizace), bezpečnostní a zabezpečovací úkoly. Pro takovéto typy služeb rychlosti v řádech jednotek až desítek kbit/s jsou dostačující. V současné době existuje několik implementací úzkopásmové služby pro přenos dat. Většinou se jedná o uzavřené specifikace energetických a distributorských společností. Jednou z výjimek je projekt PRIME, který je spravován sdružením několika firem z oblasti energetiky.

I přesto, že jsou úzkopásmové systémy v praxi běžně používané, tak je zde prostor pro inovace. Protože jsou sítě ať už fyzikálně nebo legislativně omezeny, je kladen důraz na vytváření efektivnějších protokolů na různých vrstvách síťového modelu.

Zlepšení jsou potřebná především v oblastech zabezpečení, spolehlivosti přenášených dat nebo spotřeby síťových prvků.

Pro vývoj nových protokolů ke komunikaci přes elektrické vedení se jako nutnost jeví jejich simulace a testování. Kdyby nebyla simulace možná, tak by byl vývoj velmi obtížný. Testování na reálných sítích je velmi těžké zrealizovat a je to také velmi finančně náročné.

Pro simulaci PLC není na trhu velký výběr dostupných simulačních prostředí, což je hlavní motivace pro tuto diplomovou práci. Cílem je připravit simulační prostředí OMNeT pro potřeby simulace fyzické a linkové vrstvy PLC služby. Pro realizaci diplomové práce byl zvolen nástroj OMNeT.

1 SIMULÁTOR PŘENOSOVÝCH FUNKCÍ SIL- NOPROUDÉHO VEDENÍ V OMNET++

Tato kapitola popisuje přehled technologií a pojmů, které jsou důležité pro problematiku simulace PLC (Přenos dat po elektrické síti – Power Line Communication) sítě. Zabývat se bude problematikou silových vedení a fyzikálních vlastností. Dále je zde popsána úzkopásmová a širokopásmová technologie PLC.

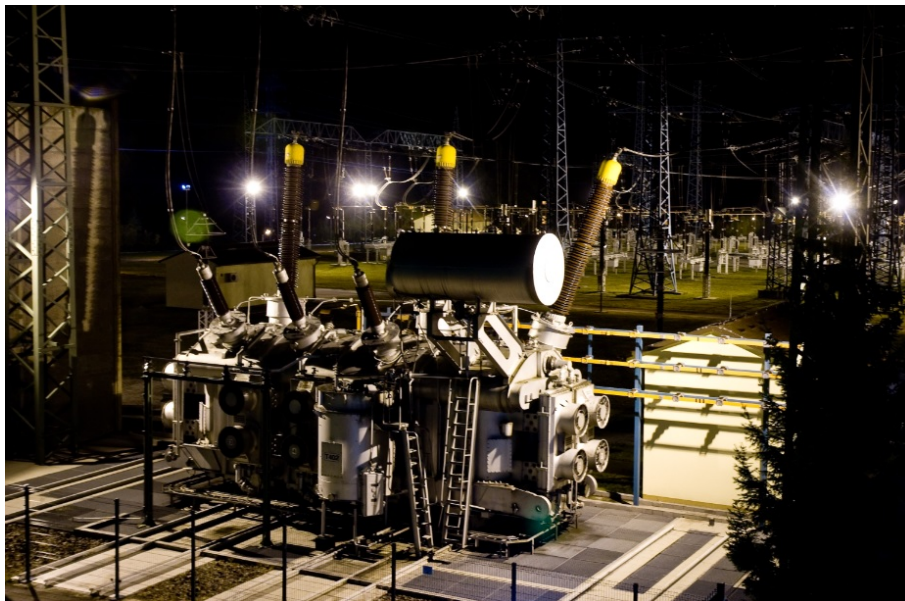
Část kapitoly se také věnuje elektrickému vedení jako sdílenému médium, tedy možnostem přístupu více stanic k médium. Závěr kapitoly patří k popisu simulačního prostředí OMNeT++.

1.1 Silová vedení

Silová vedení patří mezi nejrozšířenější infrastruktury světa. V civilizovaném světě je připojení k silové síti nutností. Na světě existuje jen málo míst, do kterých elektřina zavedena není. Už od vzniku silových vedení se zkoumala možnost různého využití. Jednalo se o služby pro sledování a kontrolu elektrické sítě nebo také telegrafické či telefonní služby. V dnešní době se kladne velký důraz na datové přenosy, ale při jejich realizaci zjistíme, že stávající sítě nebyly vybudovány s ohledem na požadavky pro datové přenosy. Například negativní vlastnosti sítě nebo jejich stáří a stav. Technologie, která využívá silové vedení pro přenos informace se nazývá PLC. Tato technologie umožňuje datové přenosy jako je diagnostika sítě nebo vysokorychlostí přenosy dat.[4]

Silová vedení se používají pro přenos elektrické energie. Silová vedení se přenáší o frekvencích 50 Hz v našich podmínkách a 60 Hz v USA. K rozvodu energie od výrobců ke spotřebitelům se používá přenosová soustava. Přenosovou soustavu v České republice tvoří elektrická vedení a zařízení o napětí 220 kV a 400 kV. Je spravována společností ČEPS a skládá se z 41 rozvodů 1.1 a 71 transformačních stanic. [1]

Přenosová soustava je využívána pro rozvod elektrické energie ke koncovým zákazníkům od transformačních stanic. Je tvořena z silového vedení a zařízeních, které pracují v napětí od 0,4 kV do 110 kV. Česká republika je rozdělena na tři distribuční oblasti. Do působnosti ČEZ Distribuce patří střední, západní, severní a východní Čechy a severní Morava. E.ON Distribuce zahrnuje jižní Čechy a jižní Moravu a do oblasti PRE Distribuce patří hlavní město Praha.[2]



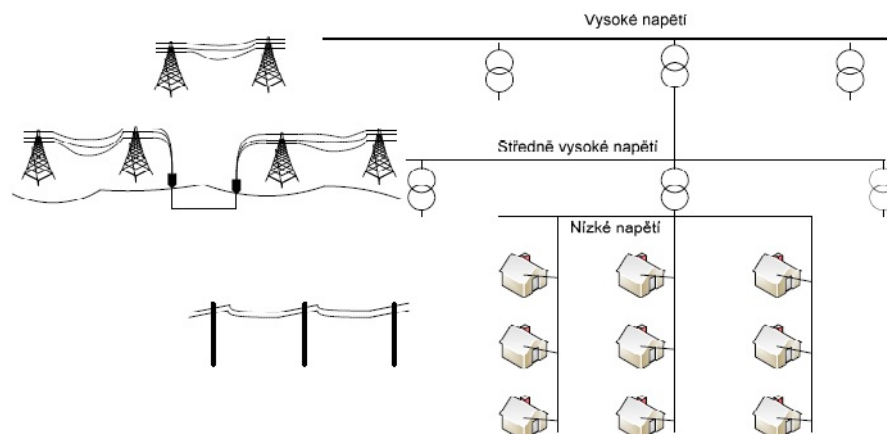
Obr. 1.1: Rozvodna.

V úvodu bylo zmíněno, že využití silového vedení není jen pro přenos elektrické energie. Od počátku 20. století se rozvíjí služby pro sledování a kontrolu elektrické sítě a následně služby pro telegrafii a telefonii. V poslední době se rozvíjí také technologie pro vysokorychlostní datové přenosy.

U datové komunikace pomocí elektrického vedení se musíme potýkat s několika problémy, které záporně ovlivňují přenos signálu. Nejhorší vliv mají některé vlastnosti vedení.

Jedná se hlavně o tyto vlastnosti:

- nepříznivě působící impedance na vysílači i přijímači
- útlum na komunikačním kanále – udává se v dB/km.
- rušení (šum)
- rušení měnící se v čase



Obr. 1.2: Struktura elektrické napájecí sítě.

Existuje několik typů rušení, které se můžou na silových vedeních projevit a ovlivnit přenos dat.

Zdrojem rušení mohou být:

- šum na pozadí – lze popsat PSD (Spektrální výkonová hustota – Power Spectral Density). Projevuje se především v nízkých frekvencích od 50 Hz do 20 kHz
- úzkopásmové rušení – většinou je způsobený zařízeními jako monitory, počítačové zdroje a televize
- impulsní rušení – většinou je způsobený spínáním kontaktů zátěže [6]

1.1.1 Rozdělení elektrické sítě

Elektrickou síť rozdělujeme podle napětí do 3 oblastí:

- nízkonapěťové sítě (230/400 V v USA 110 V) jsou využívány malými odběrateli a domácnostmi. Jejich délka je obvykle stovky metrů. Realizace ve městech je prováděna podzemními kabely a na venkově nadzemními vedeními
- středněnapěťové sítě (10-30 kV) dodávají energii do rozsáhlých oblastí, měst, k průmyslovým a komerčním odběratelům. Pokrytí těchto sítí je jednoznačně kratší a jsou realizovány nadzemními i podzemními vodiči
- vysokonapěťové sítě (110-380 kV) propojují elektrárny s rozsáhlými regiony nebo velkými zákazníky. Rozsah vysokonapěťových sítí je na dlouhé vzdálenosti pro výměnu elektrické energie mezi kontinenty. Jsou realizovány obvykle nadzemními kabely [4]



Obr. 1.3: Přenosová soustava – nadzemní vedení.

1.1.2 Domácí elektroinstalace

Elektroinstalace v domácnostech patří do NN úrovně. Vnitřní elektroinstalace patří vlastníkům domů, na venkovní síť jsou připojeni přes elektroměr. NN PLC síť lze připojit přímo ke koncovým zákazníkům. Z toho vyplývá, že použití technologie PLC v nízkonapětových sítích má velkou perspektivu pokud jde o počet připojených zákazníků. NN PLC nabízí velmi rychlé a jednoduché připojení posledních několika stovek metrů mezi zákazníky a transformátorem. Nabízí tak alternativní řešení v otázce přístupu „poslední míle“.

1.2 Technologie PLC

Přístupové sítě zprostředkovávají připojení uživatelů na širokou oblast komunikačních sítí. Umožňují velkému počtu účastníků přístup k nejrozličnějším telekomunikačním službám. Největším problémem přístupové sítě jsou náklady na realizaci, instalaci a údržbu přístupových sítí jsou velmi vysoké. Další možností pro realizaci přístupových sítí je technologie PLC, která slouží pro přenos dat po elektrické síti. Někdy se používají také termíny BPL (Přenos dat po elektrické síti – Broadband over Powerline), PLT (Přenos dat po elektrické síti – Power Line Telecom), PLN (Přenos dat po elektrické síti – Power Line Networking). PLC umožňuje použití elektrické sítě pro účely komunikace a dnes také širokopásmové komunikační služby. Hlavní myšlenka PLC je snížení provozních nákladů a také snížení výdajů na realizaci nových teleko-

munikačních sítí. Myšlenka přenosu dat po elektrické síti není nic nového. Základní idea vychází z toho, že většina zařízení, která přijímají nebo odesílají data je připojena k elektrické síti. Pokud by se pak data dala pomocí elektrické sítě přenášet, bylo by to velmi elegantní a ekonomické řešení. PLC využívá stávající energetické rozvody.

Vznik PLC můžeme nalézt už počátku 20. století, kdy se v Evropě objevily systémy, které využívali komunikaci přes energetické sítě. První systémy CFS (Systémy s nosnou frekvencí – Carrier Frequency Systems) byly používány ve vysokonapětových rozvodných sítích, které mohly překonat vzdálenost až 500 km. Tyto systémy byly použity pro interní komunikaci elektrických zařízení, realizaci dálkového měření a kontrolní úkoly. Jednalo se o hromadné dálkové ovládání rozvodné sítě. Komunikace pro středně a nízko napěťové sítě byla také realizována. Systémy RCS (Signalizace nosnou vlnou – Ripple Carrier Signaling) byly aplikovány na středně a nízko napěťové sítě pro realizaci řízení elektrických napájecích systémů.

V dalším vývoji technologie PLC se zaměřovalo do oblasti automatického vzdáleného řízení. Až koncem 80. let se začali navrhovat technologie, díky kterým bylo možné poskytnout širokopásmový přenos po elektrickém vedení. Roku 1997 byla odzkoušena první komunikace tohoto typu. Tato komunikace byla uskutečněna ve Velké Británii.

Od této doby vývoj pokročil. První systémy umožňovaly rychlost v jednotkách Mbit/s, dnešní systémy pracují s rychlostí až 200 Mbit/s. PLC technologie se používá u realizace tzv. In-home PLC systémů. Tato technologie umožňuje správu elektrických zařízení v budovách. Používá se například pro vytápění, osvětlení nebo zabezpečení.

Mezi největší problémy přenosu dat po elektrické síti je útlum signálu a vysoké rušení, které způsobují přístroje do sítě zapojené nebo jiné služby tab. 1.1. Každopádně moderní PLC technologie tato úskalí překonávají a řeší. PLC sítě můžeme rozdělit do dvou základních skupin, které se označují jako úzkopásmový a širokopásmový typ služby.

V současnosti je velké množství společností zaměřeno na vývoj a použití technologie PLC. Počet zkušebních uživatelů technologie PLC stále roste. Zvláště v USA, kde je již tato technologie využívána pro různé firemní a lokální sítě. [3], [6]

Tab. 1.1: Možné zdroje rušení PLC a jejich pásma

| Třída | Služby | Pásmo [MHz] |
|--------------------|---|--|
| Rozhlas | Středně a krátkovlnné vysílání | 1.3–1.6; 3.9–4.0; 5.9–6.0, 6.0–6.2; 7.1–7.3; 7.3–7.35; 9.4–9.5; 9.5–9.9; 13.5–13.6; 13.6–13.8; 15.1– 15.6; 25.6–26.1 |
| Námořní komunikace | Taktické / strategické námořní vysílání Námořní vysílačky Nouzová a bezpečnostní komunikace Námořní rozhlasová komunikace Námořní DGPS | 1.6–1.8; 2.04–2.16; 2.3–2.5; 2.62–2.65; 2.65–2.8; 3.2–3.4; 4.0–4.4; 6.2–6.5; 8.1–8.8; 12.2–13.2; 16.3–17.4; 18.7 –18.9; 22.0–22.8; 25.0–25.21 |
| Radioamatéři | Datamode, fax, telefon, atd. | 1.81–1.85; 3.5–3.8; 7.0–7.1; 10.1–10.15; 14.0–14.2; 14.25–14.35; 18.0–18.16; 21.0–21.4; 24.8– 24.9; 28.0–29.7 |
| Vojáci | Vzdálená komunikace NATO a UK | 2.0–2.02; 2.02–2.04; 2.3–2.5 |
| Letectvo | Letectvo | 2.8–3.0; 3.02–3.15; 3.4–3.5; 3.8–3.9; 4.4–4.65; 5.4–5.68; 6.6–6.7; 8.81–8.96; 10.0– 10.1; 10.1–11.1; 21.0–22.0; 23.0–23.2 |
| Radioastronomie | Radioastronomie | 13.3–13.4; 25.55–25.67 |

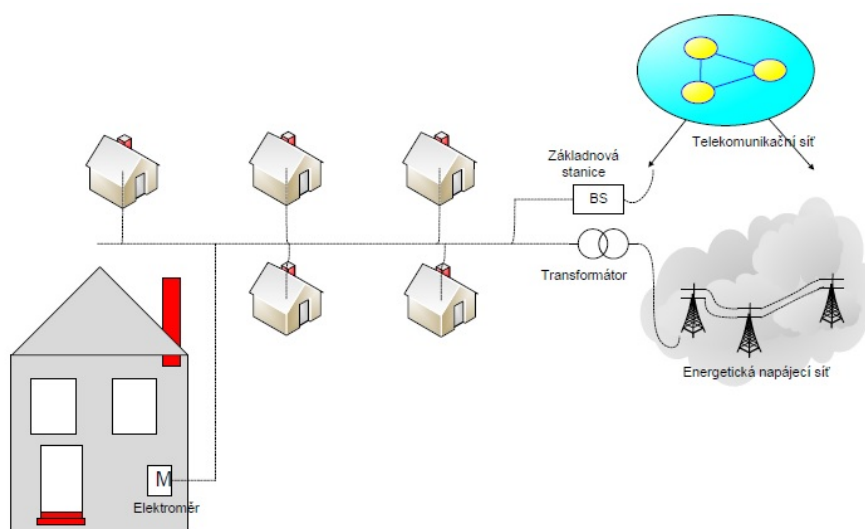
1.2.1 Základní prvky PLC sítě

Základní prvky PLC sítě jsou nezbytné pro realizaci vlastní komunikace přes elektrické rozvodné sítě. Hlavním úkolem základních prvků je signalizace, příprava a konverze signálu pro jeho přenos přes rozvod elektrické energie, příjem signálu. V každé přístupové PLC síti musí být tyto dvě zařízení:

- PLC modem.
- PLC základnová / řídicí stanice.

PLC modem implementuje všechny funkce fyzické vrstvy, včetně modulace a kódování. Propojuje standardní komunikační zařízení, která jsou používána uživatelem, s elektrickou sítí. Ze strany uživatele může být připojení k PLC modemu realizováno pomocí různých standardních rozhraní (např. Ethernet, USB). Na druhé straně je PLC modem připojen k distribuční soustavě za použití zvláštní spojovací metody, která umožňuje odesílání datových signálů do elektrické sítě a zároveň i jejich příjem.

Základnové PLC stanice zajišťují přístup k páteřní síti. Vytvářejí propojení komunikační sítě s rozvodnou sítí. Základnová stanice neslouží pouze k připojení jednotlivých účastníků, ale umožňuje komunikaci pomocí více typů připojení. Například xDSL, WLAN pro bezdrátové propojení. Obvykle základnová stanice řídí provoz v určité PLC přístupové síti. Ve zvláštních případech však může každý PLC modem převzít kontrolu nad síťovým provozem a nad realizací spojení s páteřní sítí. [4]



Obr. 1.4: PLC síť.

1.2.2 Úzkopásmová služba PLC

Úzkopásmové PLC sítě jsou provozovány ve frekvenčním rozsahu, který je určen normou CENELEC. Tento rozsah je 9 až 148,5 kHz. Rychlost se pohybuje v jednotkách až stovkách kbit/s. Tento frekvenční rozsah je rozdělen do tří pásem: pásmo A, které je používáno distributory a pásma B a C, které jsou určeny pro soukromé použití. Frekvence v pásmech B a C se používají hlavně v oblasti automatizace. V současné době úzkopásmové PLC systémy poskytují rychlost přenosu dat až na několik tisíc bitů za sekundu. Maximální vzdálenost mezi dvěma PLC modemy může být až 1 km. K překonání delších vzdáleností je nutné použít opakováč.[6]

Využití úzkopásmových sítí:

- v hovorových službách – služební a standartní telefonie
- nehovorové služby – dálková měření, regulace, ovládání, dálkový odečet bytových měřičů

Tab. 1.2: Kmitočtová pásma v úzkopásmové verzi PLC podle normy CENELEC

| Označení pásma | Frekvenční pásmo | Využití |
|----------------|------------------|-------------------------------------|
| A | 3-95 kHz | Pro účely dodavatele energie |
| B | 95-125 kHz | Pro privátní použití (např. budovy) |
| C | 125-140 kHz | Pro privátní použití (např. budovy) |
| D | 140-148,5 kHz | Pro privátní použití (např. budovy) |

Modulace v úzkopásmových PLC systémech

Modulace je proces, kterým se mění charakter vhodného nosného signálu pomocí modulujícího signálu. Modulace se velmi často používá při přenosu nebo záznamu elektrických nebo optických signálů. Pro úzkopásmovou variantu PLC se využívají následující modulace:

- ASK (Klíčování amplitudovým posuvem - Amplitude-shift keying) – využívá amplitudovou modulaci, používaly ji první úzkopásmové sítě PLC. Tato modulace není odolná proti rušení, proto je taková modulace nevhodná pro použití v PLC sítích
- BPSK (Dvoustavového klíčování fázovým posunem - Binary Phase Shift Keying) – využívá velké množství nosných frekvencí, které jsou vzájemně ortogonální. Tato modulace je odolná proti rušení. Díky tomu je vhodná pro PLC sítě, ale díky tomu, že pro realizaci je nutná detekce fáze, tak může být velmi složitá. Proto se BPSK systémy v běžných situacích nepoužívají.
- OFDM (Ortogonalní kmitočtový multiplex - Orthogonal Frequency Division Multiplexing) – využívá změnu fáze nosného signálu [3], [6]

Úzkopásmový systém PLC v domácích sítích

Úzkopásmový systém PLC se také používá v budovách. Automatizační PLC systémy se realizují bez instalace dodatečné komunikační sítě. Díky tomu, vysoké náklady, které jsou nutné pro instalaci nových sítí v rámci stávajících budov, mohou být velmi výrazně sníženy využitím technologie PLC. Automatizační systémy realizované pomocí PLC mohou být použity pro různé účely:

- Ovládnání zařízení, které jsou ve vnitřní elektroinstalaci. Jsou to např.: vytápění, osvětlení, klimatizace.
- Centrální ovládání systémů, jako jsou např.: ovládání dveří nebo zatemňování oken.
- Zabezpečovací úlohy, dohled a propojení senzorů.

Automatizační PLC systémy nejsou používány pouze ve velkých budovách, ale vyskytují se často také v soukromých domácnostech, pro realizaci podobných automatizačních úkolů. V tomto případě se hovoří o tzv. "inteligentních domech". [4], [5]

1.2.3 Širokopásmová služba PLC

Širokopásmové PLC systémy poskytují podstatně vyšší rychlost přenosu dat než úzkopásmové PLC systémy (více než 2 Mbit/s). Pracuje v rozsahu 2 MHz až 30 MHz. Pokud v úzkopásmové síti lze realizovat pouze malý počet hlasových kanálů a přenos dat s velmi nízkou bitovou rychlostí, širokopásmové PLC nabízí více hlasových spojení, vysokorychlostní přenos dat, přenos videa a zároveň i služby úzkopásmového PLC systému.

Realizace širokopásmových komunikačních služeb prostřednictvím energetických rozvodných sítí umožňuje vytvoření nákladově efektivní telekomunikační sítě. V takové síti není nutnost pokládat nové kabely, ale elektrické rozvodné sítě nejsou určeny pro přenos informací a z toho vyplývají některé omezení při používání širokopásmového PLC. Například to, že vzdálenosti, které mohou být zahrnuty, stejně jako rychlost přenosu dat, který může být realizován pomocí PLC systémů, jsou omezené.

PLC síť funguje jako anténa. Proto se stává zdrojem šumu pro jiné komunikační systémy pracující ve stejném kmitočtovém rozsahu (např. rozhlasové služby). Z tohoto důvodu musejí širokopásmové PLC systémy pracovat s omezeným výkonem signálu, což však snižuje jejich výkonnost (rychlost přenosu dat, vzdálenosti).

Aktální širokopásmové systémy PLC obsahují střední a nízké napětí. V domácnostech dosahují rychlostí až 12 Mbit/s. U některých výrobců se můžeme setkat se zařízeními, které umožňují mnohem větší rychlost přenosu dat. Tato rychlost může přesahovat až 100 Mbit/s.

Středně napěťová PLC technologie se využívá pro zrealizování spoje point-to-point. Díky tomuto spojení se dosahuje vzdáleností až několika set metrů. Tato technologie se používá pro spojení místních LAN sítí, sítí mezi budovami nebo v rámci areálu.

Nízko napěťová PLC technologie se využívá pro zrealizování tzv. "poslední míle" telekomunikačních přístupových sítí. Současný vývoj širokopásmových PLC technologií se zaměřuje na aplikace v přístupových sítích. [4]

Využití širokopásmových PLC sítí:

- LAN síť
- přenos sdružených kanálů
- přístup k internetu

Širokopásmový systém PLC v domácích sítích

Použití širokopásmového systému PLC v domácích sítích se také označuje jako in-home. Je to využití elektrické infrastruktury domácností jako přenosového média. Díky tomu se PLC může realizovat v domácích sítích. Mohou se tak propojit stávající zařízení v domech jako jsou: telefony, počítače, tiskárny, apod. Podobně se mohou vybavit i malé kanceláře vybavit PLC systémy LAN, proto nemusíme v obou případech realizovat novou komunikační síť a vyhneme se vysokým nákladům na realizaci nové sítě.

Technologie automatizace je stále více populární. Její použití je velmi široké např.: v průmyslových a obchodních sítích, ale také v domácnostech. Poskytují se služby jako jsou zařízení pro zabezpečení, vytápění nebo automatické řízení světel. Aby tyto služby mohly být zrealizovány, tak se musí připojit velké množství koncových zařízení. Senzory, kamery, světla a elektromotory.

In-home PLC technologie se zdá být rozumným řešením pro realizaci takovýchto sítí s velkým počtem koncových zařízení. Především ve starších budovách a domech, ve kterých není vhodná infrastruktura. Struktura in-home PLC sítí se velmi neliší od systémů v nízkonapěťových sítích PLC. Používají se také základnové stanice, které slouží pro kontrolu in-home sítě a umožňují připojení na venkovní síť. Všechna zařízení v in-home síti jsou propojena prostřednictvím PLC modemů. Zařízení mohou být připojeny k in-home síti kdekoliv, kde je k dispozici zásuvka.

In-home PLC síť může existovat jako nezávislá síť, která pokrývá pouze jeden dům nebo budovu, nebo také může sloužit pro vzdálenou kontrolu (např. zabezpečení, řízení spotřeby energie atd.). [4], [5]

1.2.4 Dálkový odečet dat

Dálkový odečet dat slouží pro hromadné získávání dat měřících přístrojů, mohou to být elektroměry nebo plynoměry. K získávání dat se odehrává bez účasti lidského faktoru. Zařízení musí ovšem obsahovat PLC modem a také implementovat protokol komunikace.

Příklad realizace dálkového odečtu elektroměru na úzkopásmové síti PLC nízkého napětí. Měření probíhá na koncové síti (last mile). Tato síť je oblast od transformační stanice směrem ke koncovým odběratelům. V takovéto síti se může nacházet více odběratelů schopných odeslat data k dálkovému odečtu. Síť se musí skládat z několika prvků: koncentrátorů, opakovačů, centrální řídicí stanice a účastníků. PLC modem v sobě zahrnuje funkcionalitu fyzické a linkové vrstvy.

Při komunikaci jsou data od účastníků shromážděna koncentrátorem a následně jsou předána centrální řídicí stanici a tam jsou následně zpracována. Komunikace mezi koncentrátorem a centrální řídicí stanicí může probíhat službou GSM. Komunikace mezi koncentratory probíhá pomocí PLC.

Když jsou vzdálenosti mezi stanicemi velmi vysoké, tak potřebujeme signál zesílit a toho docílíme přidáním prvku mezi stanicemi. Tento prvek se nazývá opakovač.[6]

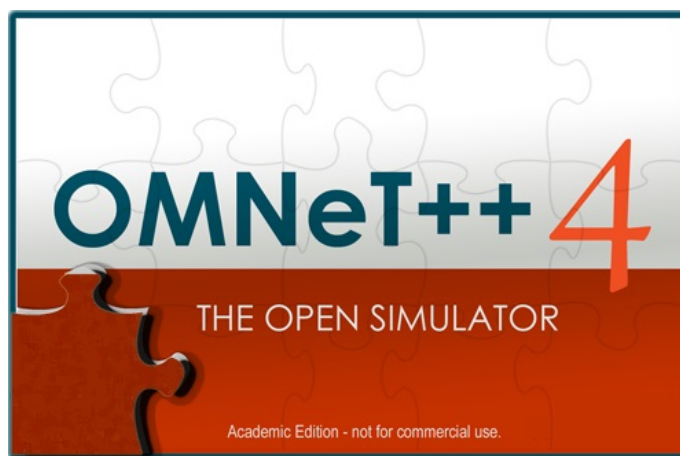
1.2.5 Přístupové metody ke sdílenému médiumu

Elektrické vedení lze chápat také jako sdílené médium. Proto musíme při tvorbě modelu přenosového kanálu brát v úvahu i problém kolizí při vysílání více stanic najednou. Pro řešení tohoto problému se používá několik metod:

- TDMA (Vícenásobný přístup s časovým dělením - Time Division Multiple Access)
- FDMA (Vícenásobný přístup s frekvenčním dělením - Frequency Division Multiplex Access)
- SDMA (Vícenásobný přístup s prostorovým dělením - Space Division Multiplex Access)
- CSMA (Vícenásobný přístup s odposloucháváním nosného kmitočtu - Carrier Sense Multiple Access)
- CSMA/CA (Vícenásobný přístup s odposloucháváním nosného kmitočtu s vyvarováním kolize - Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)
- CSMA/CA (Vícenásobný přístup s odposloucháváním nosného kmitočtu s vyvarováním kolize - Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)

1.3 OMNeT++

OMNeT++ je objektově orientované diskretní simulační prostředí s otevřenou architekturou a dobrou podporu pro grafické rozhraní a vyhodnocování výsledků simulace. OMNeT++ může být použit pro širokou škálu simulací jako např.: pro modelování provozu komunikačních sítí, multiprocesorových architektur a dalších distribuovaných, či paralelních systémů. Je naprogramován v jazyce C++ a distribuován pod volnou licencí pro akademické a nekomerční účely. Je plně integrován do vývojového nástroje Eclipse. Komerční varianta nese jméno OMNEST. Simulační prostředí a uživatelské rozhraní je multiplatformní a běží tedy, jak na systémech Unixových a Linuxových distribucí, tak pod OS Windows. Pro akademické a nekomerční využití je zdarma, jeho placená komerční verze se jmenuje OMNEST. Autorem projektu je András Varga, který na něm začal pracovat v roce 1992 na technické univerzitě v Budapešti. Díky modulární architektuře a rozsáhlé podpoře grafického rozhraní je možné systém snadno dále rozšiřovat o nové funkcionality nebo implementovat do dalších aplikací. Od svého založení v roce 1997 se komunita uživatelů a přispěvovatelů stále rozrůstá a je soustředěna kolem oficiálních webových stránek.



Obr. 1.5: OMNeT++ 4.2.2.

Prostředí Eclipse poskytuje OMNeTu plnohodnotné a zároveň jednoduché uživatelské rozhraní. Simulátor pracuje v diskretním čase – všechny změny stavu systému jsou plánovány jako události(events) do seznamu událostí. Doba, ve které dojde k události se označuje jako časová značka (timestamp). Mezi dvěma událostmi se nepředpokládá, žádná změna systému, a proto může být tato doba přeskočena a zpracována další událost, čímž se liší od reálného spojitého času. Definice parametrů modulů se provádí jazykem NED. Ten je vytvořen pro účely OMNeTu. Funkcionalita

jednotlivých modulů je pak určena kódem v jazyce C++ s modulární architekturou, díky které se může dále rozšiřovat.

Velkou výhodou OMNeTu je dostupnost velkého množství frameworků. Je zde možnost pracovat přímo se vstupem ze souboru XML. [8]

1.3.1 Jazyk NED

Základem každé simulace je její topologie definovaná pomocí jazyka NED. Jazyk NED umožňuje modulární popis sítí. To znamená, že síť se může skládat z mnoha typizovaných součástí, které stačí poskládat dohromady. Jsou to jednoduché nebo složené moduly a kanály pro vzájemné spojení. Všechny součásti pak mohou být znovu použity pro jiné zapojení.[8]

Popis pomocí NED může obsahovat následující komponenty v libovolném množství a uspořádání:

- import jiných modelů
- definice kanálů
- definice jednoduchých a složených modelů
- definice sítě

Rezervovaná slova

Když píšeme definici sítě musíme si dát velký pozor na to, abychom pro názvy kanálů nebo modulů nepoužívali tato rezervovaná slova:

```
import channel endchannel simple endsimple module endmodule error
delay data rate const parameters gates submodules connections
gatesizes if for do endfor network endnetwork nocheck ref ancestor
true false like input numeric string bool char xml xmldoc
```

2 NÁVRH ŘEŠENÍ

Tato část semestrální práce se zabývá možnostmi řešení daného problému. Hlavním úkolem byl výběr frameworku pro použití OMNeT. Dále je zde popsána reprezentace modelu PLC sítě, protože je to velmi důležitá část semestrální práce. Problém nalezení správného modelu se skládá z řady problémů. Každý problém dává k zvážení více různých řešení.

2.1 Výběr simulačního frameworku pro prostředí OMNeT

OMNeT poskytuje jednoduché uživatelské prostředí, takže i nový uživatelé, kteří mají alespoň částečnou znalost programovacího jazyka C++ se budou schopni rychle zorientovat v jeho používání. K OMNeTu existuje celá řada rozšíření a to OMNeTu dodává nové možnosti.

Výběr frameworku probíhal tak, aby splňoval požadavky pro simulaci. Vytvořit simulaci PLC se standardními nástroji OMNeTu by sice šlo zrealizovat, ale bylo by to časově velmi náročné a muselo by být vyřešeno celá řada problémů, které už jsou vyřešeny. Pro OMNeT existuje velké množství frameworků, ve kterých je celá řada řešených problémů. Proto byla potřeba prozkoumat jejich možnosti, aby se dal použít v PLC sítích.

Požadavky pro hledaný framework:

- podpora pro definici přenosového kanálu na úrovni nastavení útlumu
- detekce a řešení kolizí – obsahuje indikaci nastalé kolize
- definice zpoždění kanálu
- návaznost na vyšší vrstvy modelu OSI

Pro OMNeT byly uvažovány dva možné frameworky. Byly to MiXiM a INET.

INET je open source framework pro simulaci jak bezdrátových tak i klasických sítí. INET patří mezi nejrozšířenější frameworky. Obsahuje možnost implementace řady protokolů síťové i vyšších vrstev.

MiXiM je framework pro simulaci mobilních, bezdrátových a senzorových sítí. Obsahuje také prvky, které jsou vhodné pro popis přenosového kanálu na fyzické vrstvě.

Tyto frameworky splňují většinu požadavků, které jsou popsány výše. Vhodnější se ukázal výběr frameworku MiXiM, protože jeho výhodou proti INETu je možnost práce s definicí parametrů přenosového kanálu. Pro MiXiM je také dostupná dokumentace, ve které najdeme celou řadu příkladů.

2.2 Model fyzické vrstvy

Pro popis fyzické vrstvy si lze komunikační kanál tvořený elektrickým vedením představit několika parametry, jako útlum či zpoždění signálu. I když není simulační nástroj OMNeT určen pro hlubší modelování přenosového kanálu elektrického vedení, přesto když spolu s ním použijeme framework MiXiM můžeme dosáhnout velice detailního modelu.

2.2.1 Definice topologie sítě a uzlů

V každé simulaci se musí nejprve definovat topologie testované sítě. U PLC sítí to může představovat mále sítě s jednotkami uzlů nebo také o velmi velké sítě, které mohou mít až několik stovek uzlů.

Elektrickou síť tvoří řada prvků (elektrické kabely apod.), kterým lze přiřadit různé vlastnosti jako jsou zpoždění, útlum nebo délka. Topologii tak můžeme sestavit z menších částí, tak aby celek odpovídal reálné elektrické síti. K tomuto řešení potřebujeme znát všechny parametry, proto je toto řešení obtížné. Jednotlivé parametry může být těžké získat nebo je nemusíme znát vůbec.

Pro simulaci bude proto použité jiné řešení. Elektrickou síť považujeme jako sdílené médium. Následně můžeme takovou topologii vyjádřit úplným grafem, kde mezi každými dvěma uzly grafu jsou definovány parametry. Takové řešení představuje velké zjednodušení modelu. Díky tomu stačí definovat parametry kanálu mezi dvěma uzly, které odpovídají jeho vlastnostem při komunikaci mezi těmito dvěma uzly. Nevýhodou tohoto řešení může být složitost simulace. Když propojíme všechny dvojice uzlů tak se může velmi zvýšit paměťová náročnost. Když definujeme topologii sítě musíme také definovat jednotlivé parametry uzlů.

2.2.2 Možnost vstupu dat

OMNeT umožňuje v grafickém prostředí ruční definici topologie sítě výběrem jednotlivých komponent z panelu nástrojů. Tato varianta se používá pro malé sítě a je uživatelsky velmi výhodná, protože můžeme testovanou síť sestavit velmi rychle a okamžitě začít se simulací. Když máme velkou síť, která obsahuje velké množství uzlů (desítky až stovky) je tento postup nepoužitelný. Pro velké sítě proto potřebujeme rozhraní, ve kterém je možné definovat výslednou topologii ručně. Nejjednodušší variantou je pro vstup dat použít textový soubor, který obsahuje popsanou topologii a parametry sítě. Tento soubor je načten před začátkem simulace, obsahuje v sobě popsanou topologii i parametry sítě.

2.2.3 Přenosová funkce a zpoždění kanálu

Po definici sítě musíme dané síti přiřadit parametry a definovat přenosovou funkci kanálu. Pro simulaci byla vybrána možnost přímé definice $H(f)$. Důvodem je, že reálné sítě jsou málokdy popsány parametry ze kterých by šla funkce vypočítat, ale útlum proti tomu lze mezi dvěma uzly na reálné síti změřit. Celou reprezentaci $H(f)$ můžeme nahradit hodnotou útlumu. Díky tomu můžeme použít jednoduchý model. Dalším problémem je časová proměnnost funkce $H(f)$. Lze definovat časově závislou funkci $H(f,t)$, aby se lépe simulovala časová změna útlumu kanálu.

Zpoždění kanálu

Zpoždění kanálu lze chápat jako parametr, který vyjadřuje dobu, za kterou signál dorazí ze zdroje do cílového uzlu. Zpoždění lze spočítat, ale musíme znát vhodné parametry elektrického vedení. Stejně jako u útlumu je lepší variantou přímé zadání hodnoty zpoždění na vstupu simulátoru. Tyto hodnoty je snazší získat měřením než je složitě vypočítávat z parametrů elektrického vedení. Stejně jako u útlumu mezi dvěma uzly můžeme předpokládat rozdílné zpoždění signálů ve směrech od zdrojového a ke zdrojovému uzlu.

2.2.4 Formát vstupních dat

Jako vstupní rozhraní pro definici topologie, uzlů a parametrů elektrického vedení byl vybrán jazyk XML. XML je velmi vhodný a to díky své rozšiřitelnosti a širokému množství použití. Pro volbu formátu XML také hovoří jeho vestavěná podpora v prostředí OMNeT. OMNeT podporuje čtení konfiguračních dat z XML souborů.

Pro definici sítě je vhodné použít dva soubory XML. V prvním souboru XML se definují uzly sítě a ve druhém se definuje topologie sítě a parametry mezi každými dvěma uzly sítě.

Soubor XML ve kterém budou definovány jednotlivé uzly obsahuje seznam jednotlivých uzlů a jejich identifikátory. Tyto identifikátory jsou libovolně zvoleny, ale musí odpovídat identifikátorům použitých v XML souboru s topologií sítě. Pro označení typu uzlů se používá element `<type>`.

Přehled typů uzlů:

- **Normal** – uzel, který komunikuje s ostatními **normal** uzly sítě.
- **Narrownoise** – uzel, který simuluje v síti úzkopásmové rušení.
- **Impulsnoise** – uzel, který simuluje v síti impulzní rušení.
- **Repeater** – uzel, který slouží jako zesilující prvek signálu.

Příklad definice XML souboru pro tři uzly PLC sítě. Uzly s `phyid = 1` a `phyid = 2` jsou uzly PLC sítě, které jsou schopny komunikovat s ostatními **normal** uzly sítě. Uzel s `phyid = 10` v PLC síti nahrazuje zdroj úzkopásmového rušení.

Ukázka XML souboru, ve kterém jsou definovány uzly sítě:

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<root>
  <node phyid="1">
    <type>normal</type>
  </node>

  <node phyid="2">
    <type>normal</type>
  </node>

  <node phyid="10">
    <type>narrownoise</type>
  </node>
</root>
```

Soubor XML ve kterém bude definována topologie definuje parametry přenosového kanálu mezi každými dvěma uzly sítě. Útlum i zpoždění musí být definován pro všechny dvojice uzlů v síti. Pro označení cílového uzlu pro příjem signálu se používá element `<DestinationNode>` a pro označení zdrojového uzlu se používá element `<SourceNode>`. Útlum signálu pro danou dvojici je určen elementem `<att>` a je udáván v dB. Pro zpoždění signálu se používá element `<delay>` a je udáván v ms.

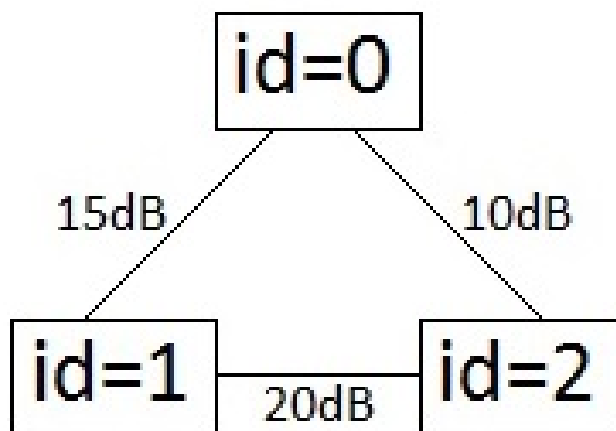
Předpokládá se, že parametry jednotlivých kanálů budou pro potřeby simulace spočteny nebo změřeny. Následně pomocí XML souborů.

Příklad definice XML souboru pro definici topologie sítě se třemi uzly. Signál z uzlu `phyid = 1` je vyslaný do uzlu `phyid = 0` a je tlumen 15dB. Zpoždění signálu je 2ms. Signál z uzlu `phyid = 0` je vyslaný do uzlu s `phyid = 1` a je tlumen 10dB. Zpoždění signálu je 3ms.

Ukázka XML souboru, ve kterém je definována topologie a parametry sítě:

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<root>
  <DestinationNode phyid="0">
    <SourceNode phyid="1">
      <att>15</att>
      <delay>2</delay>
    </SourceNode>
    <SourceNode phyid="2">
      <att>10</att>
      <delay>1</delay>
    </SourceNode>
  </DestinationNode>
  <DestinationNode phyid="1">
    <SourceNode phyid="0">
      <att>10</att>
      <delay>3</delay>
    </SourceNode>
    <SourceNode phyid="2">
      <att>20</att>
      <delay>1</delay>
    </SourceNode>
  </DestinationNode>
  <DestinationNode phyid="2">
    <SourceNode phyid="0">
      <att>10</att>
      <delay>1</delay>
    </SourceNode>
    <SourceNode phyid="1">
      <att>20</att>
      <delay>1</delay>
    </SourceNode>
  </DestinationNode>
</root>
```

Pokud definujeme XML soubory tímto způsobem, tak to má nevýhodu v tom, že výsledná velikost XML souborů může být velká. Příklad topologie sítě je na obr. 2.1



Obr. 2.1: Topologie sítě – ukázka

2.2.5 Řešení kolizí

PLC síť považujeme jako sdílené médium, ke kterému může v jedné okamžik přistupovat několik stanic. Proto musíme vyřešit problém kolizí. Kolize vznikne, když dvě nebo více stanic vysílá najednou. Fyzická vrstva umožňuje kolizi detekovat a když ji požádá vyšší vrstva o informace o tomto stavu tak jim je zašle.

Pro řešení kolizí má MiXim nástroj, který tento problém obslouží. Na všechny signály na médiu reprezentované zprávou `AirFrame` jsou v objektu `ChannelInfo` uchovány reference. Tento objekt má informace a prostředky ke zjištění kolize. Výskyt kolize zjistí vyšší vrstva dotazem na tento objekt.

2.2.6 Rušení

Parametr, který potřebujeme také modelovat je rušení. V simulaci je rušení reprezentováno speciálním typem uzlu. Tento uzel rušení vytváří. Uzly které rušení vytváří budou definovány společně s ostatními uzly ve vstupním souboru XML s označením v elementu `<type>`.

2.2.7 Přenosová rychlost kanálu

S přenosovou rychlostí kanálu lze pracovat dvěma způsoby. Jedním z nich je napevno nastavená hodnota bitového toku, která je při vysílání použita. U tohoto způsobu až samotné vlastnosti kanálu určí, zda lze informace v pořádku doručit. Druhou variantou je, že fyzická vrstva umožní detekovat vlastnosti kanálu a podle nich nastaví parametry vysílaného kanálu.

Pro práci s přenosovou rychlostí je v MiXiMu použita třída **Decider**, ve které jsou definovány podmínky pro výpočet přenosové rychlosti a chybovosti kanálu.

2.3 Model linkové a vyšších vrstev

Linková vrstva

Hlavním úkolem linkové vrstvy je fyzická adresace uzlů a podpora přístupu ke sdílenému médiumu.

Rámčům se musí při odeslání přiřadit MAC adresa. Pro adresaci je použito automatického generování a přidělování MAC adres uzlům sítě MiXiMem pomocí interfacu **AddressingInterface**. Reálná zařízení PLC mají většinou definovanou adresu už z výroby. Pro účely simulátoru je dostačující řešení automatického přidělování adres MiXiMem.

Pro přístup ke sdílenému médiumu v PLC sítích je použita metoda CSMA, pro kterou je v OMNeTu připraven modul. Tento modul umí simulovat chování této metody.

Vyšší vrstvy

S použitím frameworku MiXiM je k dispozici mnoho implementovaných protokolů vyšších vrstev. Tyto protokoly lze začlenit do simulace. V MiXiMu můžeme také definovat další vrstvy, které reprezentují síťovou a aplikační vrstvu.

Příklad použití pro síť dálkového odečtu elektroměrů. Síť funguje tak, že jeden uzel v síti si vyžádá od ostatních uzlů stav elektroměrů. Uzly následně odpoví zprávou, která obsahuje aktuální stav elektroměrů.

Komunikace mezi uzly probíhá pomocí předávání zpráv. Když potřebuje uzel zaslat zprávu, musí se nejdříve vytvořit na aplikační vrstvě a postupně je předávána do nižších vrstev.

2.4 MiXiM

MiXiM je simulační prostředí, které tvoří nadstavbu simulátoru OMNeT. Je navržen především pro oblast mobilních a bezdrátových sítí. Jeho prostředí nabízí již předpřipraveny možnosti pro práci se signály, ale i implementaci protokolů pro různé vrstvy sítě jako jsou CSMA, IEEE 802.15.4, IEEE 802.11.

Sít, která je modulovaná pomocí MiXiMu je složena z vrstev. Tyto vrstvy mohou odpovídat vrstvám OSI, ale i nemusí. Každá vrstva je reprezentovaná modulem. Tento modul může být složen z dalších modulů.

V této kapitole budou popsány základní možnosti modelování pomocí frameworku MiXiM a také některé z jeho tříd.

MiXiM vznikl tak, že se sloučili existující frameworky z oblasti bezdrátových sítí (ChSim, MacSimulator, Mobility Framework, Positif Framework). Instalační balík MiXiMu je dostupný na DVD, které je přiloženo k diplomové práci nebo na [7]. Instalace je popsána v kapitole 2.6.1.

2.4.1 Základní struktura sítě

Sít, která je modelovaná MiXiMem je složena z vrstev. Tyto vrstvy mohou odpovídat vrstvám modelu OSI, ale také nemusí. Každá vrstva je zastoupena NED modulem, ten ale může být složen z dalších modulů. Aby byla zachována možnost jednoduše vrstvy na stejné úrovni nahrazovat, musí každý modul vrstvy implementovat stejné NED rozhraní. Díky tomuto se zajistí, že moduly budou propojitelné pomocí stejných bran.

Nejjednodušeji se v MiXiMu vytvoří nová vrstva, která bude kompatibilní s ostatními vrstvami tak, že se vytvoří nový modul, který dědí od základní implementace. Pro fyzickou vrstvu je to modul `BasePhyLayer` s rozhraním `IWirelessPhy`, pro MAC vrstvu je to `BaseMacLayer` s rozhraním `IWirelessMac`, pro síťovou vrstvu `BaseNetwLayer` s rozhraním `IBaseNetwLayer`. Aplikační vrstva musí přímo implementovat rozhraní `IBaseApplLayer`, protože v MiXiMu není defaultní implementace takového rozhraní.

Příklad definice bran fyzické vrstvy v NED souboru. Brány jsou definovány pouze směrem k vyšším vrstvám:

```
gates :  
    input upperLayerIn ;  
    output upperLayerOut ;  
    input upperControlIn ;  
    output upperControlOut ;  
    input radioIn ;
```

Příklad definice bran síťové vrstvy v NED souboru. Brány jsou definovány směrem k vyšší i nižší vrstvě:

```
gates :  
    input upperLayerIn ;  
    output upperLayerOut ;  
    input upperControlIn ;  
    output upperControlOut ;  
    input lowerLayerIn ;  
    output lowerLayerOut ;  
    input lowerControlIn ;  
    output lowerControlOut ;
```

Příklad definice bran aplikační vrstvy v NED souboru. Brány jsou definovány pouze směrem k nižším vrstvám:

```
gates :  
    input lowerLayerIn ;  
    output lowerLayerOut ;  
    input lowerControlIn ;  
    output lowerControlOut ;
```

Brány označené v názvu **Layer** slouží pro zasílání datových zpráv mezi vrstvami směrem k vyšší vrstvě **upper** a k nižší vrstvě **lower**. Brány, které jsou označeny jako **control** slouží pro výměnu kontrolních zpráv oběma směry, jak k nižším vrstvám, tak i k vyšším vrstvám. Podle těchto bran se předávají informace mezi vrstvami. Jako příklad může být indikace obsazení kanálu pro MAC vrstvu od fyzické vrstvy.

2.4.2 Komunikace mezi uzly sítě

Komunikace mezi uzly probíhá pomocí předávání zpráv. Když potřebuje uzel zaslat zprávu, musí se nejdříve zpráva vytvořit na aplikační vrstvě a postupně je předávána do nižších vrstev. Zprávy se předávají pomocí metod `sendDown`, `sendUp`, `sendControlDown`, `sendControlUp`. Tyto metody jsou zděleny třídou `BaseLayer`, ta zajistí zaslání zpráv na náležitou bránu. Na fyzické vrstvě následně proběhne předání zpráv mezi uzly. Nejdříve se vytvoří zpráva typu `AirFrame`, která je metodou `sendToChannel` třídy `ChannelAccess` předána na sdílené médium. Třídy následně zajistí doručení zprávy všem uzlům na sdíleném médiu.

Přijímané zprávy jsou v náležitých třídách zpracovány metodami `handleUpperMsg`, `handleLowerMsg`, `handleLowerControl`, `handleUpperControl` zdělených od třídy `BaseLayer`. Tyto metody lze v potomcích překrývat a tím se dosáhne požadovaného chování vrstev.

2.5 Reprezentace signálu

Předností MiXiMu je práce se signálem. V tomto ohledu nabízí široké možnosti.

V MiXiMu je signál představován třídou `Signal`, která je definovaná v `Signal.h`. Tato třída obsahuje mapování pro parametry signálu jako jsou přenosová rychlost, vysílací výkon signálu, přijatý výkon signálu nebo útlum. Dále jsou zde definovány časy začátku a konce vysílání a zpoždění signálu.

Parametry signálu jsou nastavovány pomocí metod `AddAttenuation`, `setTransmissionPower` a `setBitrate` třídy `Signal`. Aby byla definice těchto parametrů správná je důležité znát funkci následujících tříd:

- `Mapping` – poskytuje mapování mezi dimensemi (čas, frekvence) a konkrétními hodnotami
- `Argument` – slouží jako klíč pro mapování

2.5.1 Útlum signálu

Pro definici útlumu signálu je nutné implementovat rozhraní `AnalogueModel`, které má jedinou metodu:

```
Virtual void filterSignal(  
    AirFrame *frame ,  
    const Coord& sendersPos ,  
    const Coord& receiverPos  
)
```

Metoda `AnalogueModel` má jako vstupní parametry přijatý rámec a pozice vysílače a přijímače. `AirFrame` v sobě drží referenci na objekt `Signal`, proto je v této metodě možné nastavit požadovaný útlum signálu.

2.5.2 Kvalitativní spracování signálu

Přijatý signál musí být kvalitativně zpracován. Signál se porovnává s definovanou úrovní výkonu pro rozpoznání příjmu signálu. Dále se vypočítává SNR (Poměr signálu k šumu - Signal to Noise Ratio) O zpracování signálu se v MiXiMu starají rozhraní `Decider`, které je definované v `Decider.h`. Základní implementací je třída `BaseDecider`. Tato třída poskytuje základní možnosti pro výpočet SNR pomocí metody `calculateSNRMapping`. Samotný signál je zpracován metodou `procesSignal` se vstupem zprávy typu `AirFrame`. Výkon přijatého signálu je dostupný v metodě `getReceivingPower` třídy `Signal`.

Když `Decider` pozná, že rámec nemůže být přijatý, tak je zpráva `AirFrame` vymazána. Když ale signál odpovídá požadavkům, tak je zpráva `AirFrame` předána vyšším vrstvám.

2.5.3 Komponenty fyzické vrstvy

Po představení základní části frameworku MiXiM lze popsat spolupráci komponent fyzické vrstvy, které se podílejí na odesílání a zpracování signálu.

Při vysílání z jednoho uzlu sítě do druhého uzlu sítě se paket musí nejprve dostat na fyzickou vrstvu. Tam je zabalen do zprávy typu `AirFrame`. Před odesláním zprávy je potřeba do objektu vložit referenci na objekt typu `Signal`. Tomu byly definovány parametry typu `Mapping`. Zpráva `AirFrame` je dále odeslána všem uzlům přes sdílené médium. O to se stará objekt typu `ChannelInfo`, ve kterém jsou sdruženy všechny rámce vyslané na sdílené médium. Každý objekt, který reprezentuje fyzickou vrstvu uzlu má v sobě referenci na objekty `ChannelInfo`, `Decider`, `Radio` a na několik objektů typu `AnalogueModel`. Objekt `Radio` obaluje stav vysílače uzlu. Při příjmu signálu cílovým uzlem jsou využity objekty typu `AnalogueModel`, díky kterému se může vypočítat přijímaný výkon. Následně je signál zpracován objektem `Decider`. Tento objekt se stará o kvalitní zpracování signálu. Poté je z `AirFrame` získán paket vyšší vrstvy a předán tímto směrem.

2.6 Realizace

2.6.1 Instalace OMNeT

Tato kapitola popisuje instalaci OMNeTu. Je nutné stáhnout si instalační balíček z [8] nebo z přiloženého DVD. Dostupné verze jsou jak pro Windows, tak pro Linux. Pracuje se s verzí OMNeT++ 4.2.2. Pro jiné verze nemusí být kompatibilní. V distribuci pro Windows je dodáváno prostředí minGw.

Všechny distribuce obsahují pouze zdrojové kódy a je proto nutné před prvním spuštěním OMNeT zkompileovat. Aby PLC simulátor fungoval správně musíme OMNeT zkompileovat tak, aby podporoval knihovny pro parsování knihoven XML. V prostředí linuxu se to provede z příkazové řádky. Ve windows toho docílíme spuštěním `mingwenv.cmd` a musíme zadat následující příkazy:

```
./configure  
make
```

Před každým spuštěním musíme nastavit proměnné prostředí příkazem:

```
. setenv
```

Výstupem příkazu by měl být výpis cesty k adresáři `bin` OMNeTu. Kdyby jsme neměli tuto volbu, tak by šlo prostředí spustit, ale při buildování projektu by vznikly problémy. Prostředí spustíme příkazem:

```
omnetpp
```

2.6.2 Rozdělení projektů

V realizaci simulace jsem chtěl ke stávajícímu frameworku MiXiM vytvořit další dva projekty a to projekty Plc a Test. Projekty jsou popsány dále:

- MiXiM – OMNeT projekt, který reprezentuje framework MiXiM. Kromě zdrojových kódů a základních NED modulů obsahuje ještě jednoduché příklady pro nastínění možností MiXiMu. Součástí je i kompletní dokumentace frameworku.
- Plc – OMNeT projekt, který by v sobě zahrnoval funkcionality simulátoru PLC. Projekt by byl plně závislý na projektu MiXiM a bez jeho přítomnosti by nebylo možné simulátor provozovat.

- Test – OMNeT projekt, který by sloužil jako referenční projekt. Tuto strukturu by měl mít každý projekt uživatele, který chce vytvářet vlastní simulace. Test závisí na MiXiMu i Plc a bez jejich přítomnosti postrádá smysl.

2.6.3 Struktura NED balíků

Každý soubor v projektu OMNeT, který obsahuje definici prvku sítě v jazyce NED patří do většího celku, balíku (package). Práce s balíky je podobná jako např. v případě jazyka Java. Balík je v NED souboru definován následovně:

```
package plc.module
```

Struktura balíků odpovídá struktuře adresářů, ve kterých se NED soubory nacházejí. OMNeT umožňuje označit kořenový adresář pro názvy balíčků. Stačí do tohoto adresáře vložit soubor s názvem `package.ned`, který obsahuje prefix názvu balíčku.

2.7 Testování

Testování úzkopásmové sítě PLC by měla ověřit správné fungování simulátoru na všech vrstvách a za různých konfiguračních podmínek.

Testování by mělo ověřit správnost modelu fyzické a linokové vrstvy, které v sobě mohou řešit výskyt kolizí na médiu, čtení konfiguračních dat ze souboru XML a vytváření odpovídající topologie sítě se správně definovanými útlumy.

Pro účely testování měla být použita jednoduchá topologie se třemi odbočkami.

3 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala problematikou návrhu simulátoru PLC úzkopásmové sítě, který umožní uživatelům vytvářet vlastní simulace pro ověřování nových přístupů a protokolů nad touto technologií.

Nejprve bylo potřeba prostudovat problematiku datové komunikace po silnoprůdém vedení jak v úzkopásmové tak i širokopásmové variantě. Nastudování bylo zaměřeno na různé stránky týkající se problematiky technologie PLC jako je historie, využití, struktura sítě, základní prvky sítě, použité modulace nebo přístupové metody ke sdílenému médii.

Pro vytvoření simulace je použit framework OMNeT MiXiM, který splňuje většinu požadavků a má velké možnosti v oblasti modelování přenosového kanálu. Zároveň jsou v tomto řešení implementovány některé z protokolů, které najdou využití i v PLC sítích. Framework MiXiM se do nástroje OMNeT nainportuje.

Následně proběhla analýza frameworku MiXiM, která tvořila velkou část práce. Samotný návrh systému se mi nepodařilo zrealizovat. Je zde popsán jen návrh řešení.

LITERATURA

- [1] CEPS. *Údaje o PS* [online]. 2014 [cit. 12. 12. 2014]. Dostupné z:
<<http://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Technicka-infrastruktura/Stranky/Udaje-o-PS.aspx>>.
- [2] DODAVATELÉ ENERGIE. *Distribuce elektřiny* [online]. 2014 [cit. 12. 12. 2014]. Dostupné z:
<<http://www.dodavatele-energie.cz/distribuce-energie-/distribuce-elektriny.html>>.
- [3] DOSTERT, K. *Powerline communications* 2001
- [4] HRASNICA, H., HAIDINE, A., LEHNERT, R. *BROADBAND Powerline Communications Networks* WILEY, 2004, 275s., ISBN 0-470-85741-2.
- [5] HELD, Gilbert. *Understanding Broadband over Power Line* Taylor & Francis Group, 2006, 182s., ISBN 0-8493-9846-0.
- [6] MIŠUREC, Jiří; MLÝNEK, Petr. *Systémy PLC pro dálkový sběr měřených dat* Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektroniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2009, 5 s.
- [7] MiXiM. *webové stránky* [online]. 2015 [cit. 13. 4. 2015]. Dostupné z:
<<http://www.mixim.sourceforge.net/>>.
- [8] Varga, András. *OMNeT++ User Manual* [online]. 2015 [cit. 10. 4. 2015]. Dostupné z:
<<http://omnetpp.org/doc/omnetpp/manual/usman.html>>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

| | |
|---------|---|
| ASK | Klíčování amplitudovým posuvem - Amplitude-shift keying |
| BPL | Přenos dat po elektrické síti – Broadband over Powerline |
| BPSK | Dvoustavového klíčování fázovým posunem - Binary Phase Shift Keying |
| CFS | Systémy s nosnou frekvencí – Carrier Frequency Systems |
| CSMA | Vícenásobný přístup s odposloucháváním nosného kmitočtu - Carrier Sense Multiple Access |
| CSMA/CA | Vícenásobný přístup s odposloucháváním nosného kmitočtu s vyvarováním kolize - Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance |
| CSMA/CD | Vícenásobný přístup s odposloucháváním nosného kmitočtu s detekcí kolize - Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection |
| FDMA | Vícenásobný přístup s frekvenčním dělením - Frequency Division Multiplex Access |
| OFDM | Ortogonální kmitočtový multiplex - Orthogonal Frequency Division Multiplexing |
| PLC | Přenos dat po elektrické síti – Power Line Communication |
| PLN | Přenos dat po elektrické síti – Power Line Networking |
| PLT | Přenos dat po elektrické síti – Power Line Telecom |
| PSD | Spektrální výkonová hustota – Power Spectral Density |
| RCS | Signalizace nosnou vlnou – Ripple Carrier Signaling |
| SDMA | Vícenásobný přístup s prostorovým dělením - Space Division Multiplex Access |
| SNR | Poměr signálu k šumu - Signal to Noise Ratio |
| TDMA | Vícenásobný přístup s časovým dělením - Time Division Multiple Access |

SEZNAM PŘÍLOH

A Obsah přiloženého CD

43

A OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

- Elektronická verze diplomové práce
- Soubory pro instalaci OMNeT
- Soubory frameworku MiXiM
- Příklady souborů XML